

[电力调度]

# 基于可控负荷提升风电接纳能力的优化调度路径研究

文/朱 旭<sup>1</sup> 史保康<sup>2</sup> 柯 浩<sup>2</sup>  
1. 国网金华供电公司; 2. 杭州远维电力科技有限公司

“三北”地区的严寒使得供暖成为了生活必须，在冬季面临高热负荷、低电负荷的问题。建设全面兼顾供暖并能优化电网调度的双层优化模型，利用负荷低谷的弃风时段，使蓄热罐的蓄放热能力得到高效利用，在提升风电接纳能力的同时，达到节约机组成本的目的。

近年来，我国虽为鼓励风电发展推出了一系列的激励政策，但就目前的弃风限电发展现状而言，形势依旧十分严峻。以我国东北、华北及西北“三北”地区为例，这些地区有着十分丰富的风能资源，在冬季供暖期，为满足热负荷需求采取了“以热定电”的运行模式，即利用背压式机组强迫机组出力的方式满足热负荷需求。然而，这样的运作模式不仅导致系统的调峰能力不足，而且系统接纳风电的空间也受到了压缩，继而导致外送通道的输电容量受限。为改善上述状况，本文结合国内相关研究提出了弃风环境下可控负荷优化调度的双层优化模型，将负荷低谷的弃风时段充分利用起来，以此在提升蓄热罐的蓄放热能力同时，优化机组改造的成本。

## 作为可控负荷的蓄热式电锅炉

将蓄热式电锅炉作为可控负荷纳入电网发电计划中，不仅能促进能源利用效率与合理性的有效提升，而且机组的运行成本也将大幅降低。

### 1. 基本原理

通过划分大规模风电接纳的具体范围，可使风电出力在负荷需求中的占比得到提升，进而提升区域间的风电接纳范围。在负荷低谷的弃风时段启用

蓄热式电锅炉，还能同步提升系统的电负荷水平以及系统的风电就地接纳能力。原理是通过电锅炉对电能进行转换，使其成为热能并以其中一部分为居民供热，这样便能达到热电联产机组的热负荷及供热管网热平衡；余下的部分热能被储存在储蓄罐内，一旦发生电锅炉用电功率下降或是电锅炉停运状况，储备在蓄热罐内的热能便能对居民进行补偿性供热，减轻了热电联产机组的压力，平抑了风电反调峰对系统的影响，使电网整体的压力得到缓解。多区域综合调度的电供热接纳弃风原理如图1所示。

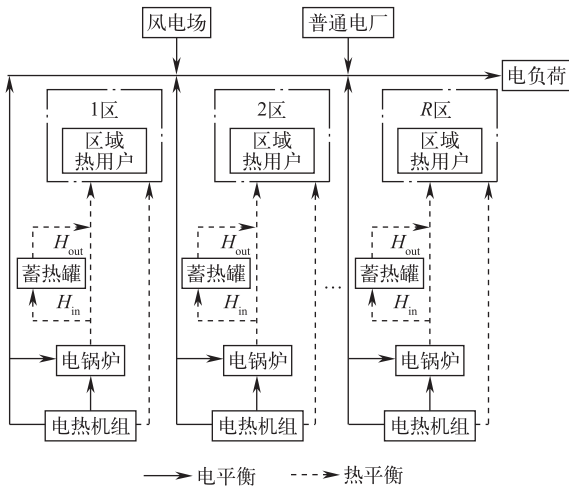


图1 多区域综合调度的电供热接纳弃风原理示意图

## 2. 蓄热装置的作用

配置蓄热装置，一方面通过对蓄热装置放热功率的调节促进系统调节能力的提升；另一方面改变传统“以热定电”运行模式，热处理需尽可能与系统热负荷保持实时均衡的态势，在提升系统整体安全性的同时，满足供热管网热平衡的要求。

传统发热所使用的电锅炉是将电能转化为热能，为减少能源浪费，尽可能采用以弃风电量取代燃煤的供热方式，但该方式会受到系统热负荷需求的限制，导致电锅炉无法在负荷低谷的弃风时段充分接纳风电，从而产生大量的弃风。为使电锅炉具有可控性，需额外添置蓄热设备（如蓄热罐），将其作为备用热源以保持热电联产机组与供热管网的热平衡，既能提高供热管网的安全性，又能全面提升供热管网整体的可靠性。

## 热电联合调度建模

### 1. 火电机组模型

纯凝火电机组的燃料成本及起停成本为

$$C_g = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [a_i P_{gi}^2(t) + b_i P_{gi}(t) + c_i] \quad (1)$$

$$C_{st} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} u_i(t)[1 - u_i(t)] C_{st,i} \quad (2)$$

式中， $T$ 为总调度的时段数； $N_g$ 为纯凝火电机组的数量； $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 为机组 $i$ 的燃料费用系数； $P_{gi}(t)$ 机组 $i$ 在 $t$ 时刻的电出力；机组 $i$ 在 $t$ 时刻的运行状态； $C_{st,i}$ 为机组 $i$ 的单个启动成本。

$$C_{chp} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{chp}} [A_i P_{chp,i}^2(t) + B_i P_{chp,i}(t) + C_i H_{chp,i}(t) P_{chp,i}(t) + D_i H_{chp,i}^2(t) + E_i H_{chp,i}(t) + F_i] \quad (4)$$

式中， $N_{chp}$ 、 $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ 、 $E_i$ 及 $F_i$ 分别为抽汽式机组的数量以及相应台数抽汽式机组的燃煤系数。

考虑到“三北”地区的冬季供暖未有间断，故机组的起停成本将不在考虑范围内。

### 3. 蓄热式电锅炉模型

室外温度、建筑的围护结构、建筑体量及墙体辐射换热等因素均对供暖质量产生影响。对此，本文将主要围绕影响风电供热系统的室内外温度因素展开探讨，借助风电预测的最小出力测算电锅炉的用电功率及蓄热罐容量，为最终计算室外温度的系数提供依据。

$$H_{cb}(t) = \eta P_{cb}(t) \quad (5)$$

## 2. 热电联产机组模型

电力系统用于热电联产的机组主要有两大基本类型，分别是背压式机组以及抽汽式机组，就“三北”地区而言，冬季供暖采用抽汽式机组偏多，本文主要针对该类型的热电联产机组展开探究。其具体的热电运行特性如图2所示。

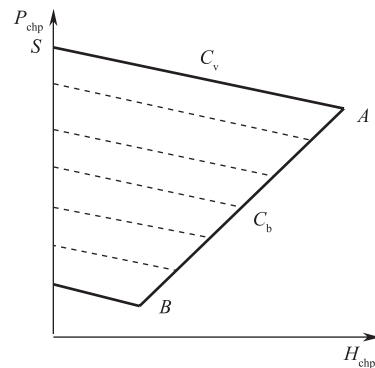


图2 抽汽式热电联产机组热电特性

抽汽式机组的运作原理是：从汽轮机的中间级抽取一定的压力，并将热蒸汽作为热源实现对外供热，当剩余热蒸汽继续做功时，汽轮机内的输出功率将因排入凝汽器凝结成水并最终回到锅炉中。基于上述原理可得纯凝工况下的电功率为

$$P_{zs,i}(t) = P_{chp,i}(t) + C_{v,i} H_{chp,i}(t) \quad (3)$$

式中， $P_{chp,i}(t)$ 、 $H_{chp,i}(t)$ 以及 $C_{v,i}$ 分别为第 $i$ 台抽汽式机组在 $t$ 时刻的发电、供热功率以及抽汽式机组的热电比。

抽汽式机组的燃料成本为

$$P_{eb}(t) = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K q_{r,k} m_{r,k} (T_{r-indide} - T_{r-outside}) \quad (6)$$

$$S_{r,H}(t) = \alpha_{loss} S_{r,H}(t-1) + H_{r,in}(t) \mu_{r,in}(t) - \frac{H_{r,out}(t)}{\mu_{r,out}(t)} \Delta t \quad (7)$$

式中， $H_{cb}(t)$ 为电锅炉 $t$ 时刻的产热功率； $\eta$ 为电锅炉的产热效率； $P_{cb}(t)$ 为电锅炉 $t$ 时刻的用电功率； $K$ 为供热区域的建筑数量； $q_{r,k}$ 为区域 $r$ 第 $K$ 个建筑的采暖热指标； $m_{r,k}$ 为区域 $r$ 第 $K$ 个建筑的供暖面积； $T_{r-indide}$ 为室内最低温度； $T_{r-outside}$ 为室外计算温度； $S_{r,H}(t)$ 为区域 $r$ 蓄热罐 $t$ 时刻的蓄热容量； $H_{r,in}(t)$ 为区域 $r$ 蓄热罐 $t$ 时刻的蓄热功率； $H_{r,out}(t)$ 为放热功率； $\mu_{r,out}(t)$ 为效率； $\alpha_{loss}$ 为漏热损失功率系数； $\Delta t$ 为调度时长。

本文所研究的对象为“三北”地区，故在选取  $T_{t-indide}$  标准时采用了国家规定的  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此次的调度时长所用系数为1，也便是1 h。

#### 4. 接纳弃风模型

$$\Delta P_{\text{chp}} = \frac{\eta}{\eta + \gamma} P_w \quad (8)$$

$$P_{\text{eb}} = \frac{\gamma}{\eta + \gamma} P_w \quad (9)$$

式中， $\Delta P_{\text{chp}}$ 、 $P_{\text{ep}}$ 、 $P_w$ 以及 $\gamma$ 分别为热电联产机组减少的发电出力、电锅炉的用电功率、接纳的风电功率及弃风时刻的热电联产机组热电比。

### 最优调度策略模型

此次优化所采用的模型为双层优化模型。其中，上层的优化最主要是为了优化可控负荷；而下层优化是为了改善电网的发电问题。两者的最终目的均是为了节约全网发电成本，并实现对电网的合理调度。

#### 1. 上层优化模型

上层优化的核心目的在于提升能源的利用效率，故须强化机组接纳系统弃风电量的能力，以此达到节约能源并减少机组运行成本的目标。要实现可控负荷的优化调度，须由可控负荷购电成本入手并以成本最小化为目标，期间所涉及的目标函数为

$$\min \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \mu_r(t) P_{r,\text{eb}}(t) - C_{\text{com}} \quad (10)$$

$$C_{\text{com}} = \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U \lambda_u P_{r,\text{eb}}(t) V_{r,u}(t) \quad (11)$$

式中， $\mu_r(t)$ 为区域 $r$ 电网 $t$ 时段的电价； $P_{r,\text{ep}}(t)$ 为区域 $r$ 电锅炉 $t$ 时段的用电功率； $C_{\text{com}}$ 为 $t$ 时段的可控负荷补偿成本； $u$ 为可控负荷用户总数； $\lambda_u$ 为用户补偿系数； $V_{r,u}(t)$ 区域 $r$ 用户 $u$ 时段的调用状态。其中， $\mu_r(t)$ 所指代的电价是下层优化模型电功率平衡约束的拉格朗日乘子；在显示调用状态方面分别以0和1来指代未调用以及调用中。

#### 2. 下层优化模型目标函数

下层优化模型的具体作用在于合理安排上网机组的处理以及对火电机组调峰能力的深挖，以此使蓄热式电锅炉的优势得到充分发挥，在确保能源的

合理利用同时，达到扩大电力交易市场的目的。下层优化模型的目标函数为

$$\min(C_{\text{fu}} + C_{\text{st}} + C_{\text{om}} + C_{\text{ct}} + C_{\text{com}} + C_{\text{curt}}) \quad (12)$$

$$C_{\text{fu}} = \sum_{r=1}^R (C_{r,g} + C_{r,\text{chp}}) \quad (13)$$

$$C_{\text{fu}} + C_{\text{st}} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_{\text{unit}}} \sum_{t=1}^T C_{r,i}(t) P_{r,i}(t) \quad (14)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_{\text{unit}}} K_{r,\text{om},i} P_{r,i}(t) \quad (15)$$

$$C_{\text{ct}} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_{\text{unit}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}} [(V_{r,ej} + V_{r,j}) Q_{r,ij} P_{r,i}(t)] \quad (16)$$

$$C_{\text{curt}} = \sum_{r=1}^R \varepsilon [P_{r,\text{wf}}(t) - P_{r,\text{wt}}(t)] \quad (17)$$

式中， $C_{\text{fu}}$ 、 $C_{\text{om}}$ 、 $C_{\text{ct}}$ 以及 $C_{\text{curt}}$ 分别为 $t$ 时刻的燃料、运维、环降和弃风成本； $N_{\text{unit}} C_{r,i}(t) P_{r,i}$ 、 $C_{r,i}(t) P_{r,i}$ 以及 $K_{r,\text{om},i}$ 分别为区域 $r$ 常规机组 $i$ 在 $t$ 时刻的发电成本、电出力和单位运维成本； $N_{\text{con}}$ 与 $Q_{r,ij}$ 分别为污染的种类以及区域 $r$ 单元单位电量的第 $j$ 项污染排放量； $V_{r,ej}$ 与 $V_{r,j}$ 为区域 $r$ 第 $j$ 项污染的环境价值及所受罚款； $\varepsilon$ 为惩罚因子，区域 $r$ 风电机组 $t$ 时刻的预测出力及实际出力则分别为 $P_{r,\text{wf}}(t)$ 与 $P_{r,\text{wt}}(t)$ 。

### 结束语

总之，供热成本过高势必会对蓄热锅炉等可控负荷的发展造成严重制约。因此，供电单位须致力于机组风电接纳能力的提升，并对机组成本予以合理优化，以此维护风电供热的良好发展。EA

(收稿日期：2022-10-25)

#### 参考文献

- [1] 楚帅，董辉，葛维春，等．一种海水淡化负荷消纳弃风电量的集群优化调度方法[J]．高电压技术，2021，47(9)：3085-3093．
- [2] 姚春晓，刘文颖，郭虎，等．多形态可控负荷参与风电消纳的荷源优化模型[J]．可再生能源，2019，37(6)：872-878．
- [3] 严翠云．基于偏差与调度经济性的风电接纳水平优化[J]．中国新技术新产品，2017(17)：29-30．